

Дослідження впливу розрахункових параметрів на розподіл температурних зон в елементах прес-форми в умовах активованої обробки

А. С. Морозов, В. Г. Олійник

Проведеними розрахунковими дослідженнями в моделі обойма-діелектрична матриця-верхній електрод-пуансон-спікаємий кільцевий виріб-нижній електрод-пуансон-підставка було визначено кінетику температурних змін. Завдяки цьому стало можливим визначення температури контрольних об'ємів виробу і оснастки в довільний проміжок часу. Експериментами підтверджено, що розрахункові значення температури в верхніх та нижніх шарах спікаємого виробу доволі подібні між собою і мало відрізняються від реальних. Зокрема встановлено, що в спікаємому виробі зосереджується 24 % теплової енергії, яке виділяється у всьому блоці (прес-інструмент-виріб). При кондукційному способі нагріву дуже важливо у самий короткий проміжок часу досягнути максимальної температури у зоні спікаємого виробу.

Показано, що при експлуатації матеріал прес-форми в умовах електро-спікання піддається термоциклічному і термомеханічному впливу. Компоненти оснастки мають різну стійкість до зносу: ресурс ізольованої вставки складає 20 циклів спікання, електродів – пуансонів 50 циклів. Це дозволяє стверджувати, що необхідно підібрати матеріал складових прес-форми, який би відповідав наступним вимогам:

- мінімальний нагрів елементів оснастки, забезпечуючих її конструкційну надійність та експлуатаційну технологічність (обойма, матриця, підставка);
- максимальний нагрів ланцюжка: верхній електрод-пуансон-ігла-спікаємий виріб-нижній кільцевий електрод-пуансон, сприяючий акумулюванню тепла в зоні дотику ділянок компонентів прес-форми з майбутнім виробом.

Вищевказані заходи призводять до підвищення структурної міцності спечених виробів, а також оптимізації контролю майбутніх технологічних операцій та оперативної фіксації важливих експериментальних даних.

Таким чином, є підстави стверджувати про можливість спрямованого регулювання температурних полів шляхом попереднього розрахунку та вибору матеріалів оснастки по теплофізичним характеристикам. Використання даної математичної моделі є ефективним способом рішення вищевказаного питання

Ключові слова: метод контрольних об'ємів, прес-інструмент, тепловий потік, електро-спікання, джоулів нагрів

1. Вступ

В процесі електроразрядної обробки металевих порошків і сплавів на їх основі відбувається одночасний вплив на матеріал пресового інструменту електричного струму, високих температур і тиску. Це суттєво ускладнює задачу вибору матеріалів без проведення попередніх розрахунків, які б дозволили встановити техно-

логічні принципи створення більш стійких комбінованих елементів оснастки для електроспінання [1]. Проведені дослідження по розробці матеріалів для прес-форми представляються значними для практики технологічних процесів порошкової металургії. Електроспінання дозволяє зробити сумісними процеси пресування і спікання, вивільнити виробничі площі, зайняті обладнанням.

На основі розвинутої моделі можна отримати розподіл тепла в деталях прес-інструменту і в спікаємому порошковому виробі. Вибір оптимального матеріалу оснастки в умовах електроспінання значно спрощує математичне моделювання процесу нагріву останньої.

Чисельне рішення виведеної системи рівнянь дозволяє визначити температуру контрольних об'ємів виробу і оснастки в довільний проміжок часу. Розрахунки, подібні описаному, дають змогу зіставити хід активованого процесу при різних конструктивних та матеріалознавчих рішеннях створення прес-інструменту і дати кількісну техніко-економічну оцінку усієї технологічної ланки.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Використання сучасних методів електрофізичної обробки дає можливість отримати матеріали з новим рівнем фізико-механічних властивостей, при цьому знизити температуру спікання і час витримки. Метод компактування порошкових виробів електроспінанням забезпечує рівномірний розподіл щільності в пресовках складної форми без застосування будь-яких пластифікаторів, які є потенційними джерелами домішок і додаткової пористості у майбутніх виробках [2]. В працях [3, 4] для дослідження нагріву пористих матеріалів були розроблені методи розрахунку розподілу температури по довжині електродів-пуансонів і контактуючого з ними виробу, що спікається. Авторами розглядається типова схема пропускання електричного струму через зразок при спрощеному припущенні про відсутність відтоку тепла у бокових напрямках. Вказані методи дають можливість отримати формули для одномірного розподілу температури в кінцевому виробі і контактуючих з ним електродам-пуансонам. Більш складні температурні поля виникають при електроспінанні кільцевих виробів [5]. Велике значення при цьому відіграють математичні моделювання складних температурних перетворень, які мають місце в зоні контакту різних матеріалів прес-форми [6].

Електроспінання слід вважати новим, доволі перспективним способом, забезпечуючим використання тепла, яке виділяється в результаті мікророзрядів, а також джоуліва нагріву. Даний спосіб інтенсифікує процеси теплової, електростатичної та іонної дифузії в зоні міжчасткового контакту, що забезпечує короткочасне спікання порошкових сумішей з отриманням високоміцних виробів [7]. Разом з тим електроспінання, як різновид гарячого пресування, характеризується не тільки інтенсивним масопереносом між компонентами сумішей, але і між порошковими частинками і деталями прес-форм. Результатом масопереносу є процеси припікання (адгезії) порошку до електродів-пуансонів. У зв'язку з цим принципове значення для впровадження такого способу в промисловість набуває проблема вибору та розробки матеріалів для прес-інструменту [8]. Основним критерієм для таких матеріалів є стійкість до різких підвищень температури: оскільки під дією електричного струму відбувається їх стрімкий нагрів [9].

В роботі [10] наведені результати досліджень нагріву пористих матеріалів електричним струмом, але не враховуються тепло- і електрофізичні процеси в електродах-пуансонах. В роботі [11] рівняння для температури в металі між електродами виведено з урахуванням теплопередачі в електродах, однак вираз для температурного поля в електродах не надається. При використанні метода скінчених елементів для розрахунку [12] температури порошку, через який пропускається електричний струм, електроди-пуансони приймаються однорідними у просторі, але не співпадають між собою. В згаданих роботах не враховується пористість оброблюваного зразка, а також тепло-, електрофізичні параметри і щільності з температурою.

Підставою для цього можуть бути об'єктивні труднощі, які пов'язані з великими витратами проведення експериментальних досліджень: особливо це стосується апаратної частини фіксуючій дуже багато параметрів при активованих процесах. Такі фактори роблять недоцільними проведення вищевказаних досліджень.

Варіантом подолання таких труднощів можуть бути роботи, присвячені математичному моделюванню теплових процесів при пропусканні електричного струму через систему електрод-пуансон-зразок-електрод-пуансон [13]. В цій роботі формулюється припущення про відсутність реальних умов відводу тепла від ділянок електрод-пуансона контактуючого із зразком.

В теорії нагріву складних електричних провідників [14] температурні поля, які б дозволили врахувати всі термофізичні процеси у зразку і контактуючими з ним електродах-пуансонах, не обчислені. Отже, експериментальним шляхом складно встановити точне розподілення температури в елементах прес-інструменту, враховуючи різну комбінацію їх матеріалів, маючих достатньо широкий діапазон теплофізичних властивостей [15].

Тому є підстави вважати, що недостатня визначеність впливу додаткових параметрів, а саме: технологічних при електроспінанні і теплофізичних, пов'язаних з матеріалами, обумовлюють необхідність проведення дослідження в цьому напрямку.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою роботи є математичний опис теплопереносу в моделі обойма-матриця-верхній електрод-пуансон-спечений зразок-нижній електрод-пуансон-підставка.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- вирішити задачу нагріву елементів оснастки методом контрольного об'єму;
- зробити аналіз результатів розрахунку представлених графічними кривими.

4. Матеріали та методи дослідження теплових ефектів, виникаючих в елементах оснастки, активованих електричним струмом

4.1. Досліджувані матеріали та обладнання, що використовувались в експерименті

Розрахункові дослідження в моделі обойма-діелектрична матриця-електрод-пуансон-спікаємий кільцевий виріб-електрод-пуансон-підставка були виконані за рахунок застосування методу контрольного об'єму. Він є одним з

найбільш ефективних серед різницевих методів рішення задач нестационарної теплопровідності. Задача вирішувалась в циліндричній системі координат.

Матеріали прес-форми були виготовлені:

- обойма – сталь 45;
- діелектрична вставка – азбоцементна труба ВТ-9;
- ігла (пола усередині) – сталь ХВГ;
- верхній та нижній електроди - пуансони – сталь ХВГ;
- підставка – сталь 3.

Для експериментальних вимірювань:

- температури – використовувались термопари контактні ТХА (хромель-алюмель), а також шлейфовий осцилограф Н 117;
- тиск підпресовки та остаточного пресування - тензопідсилювач Топаз-3-01 та тензорезистори;
- сировина для виробу – подрібнена стружка сплаву БрАЖ-9-4.

5. Результати досліджень запропонованої математичної моделі

5.1. Аналіз проходження теплових потоків через контрольний об'єм

Була вирішена задача про теплоперенос в моделі обойма-діелектрична матриця-електрод-пунсон-підставка методом контрольного об'єму. Задачу нагріву елементів оснащення вирішуємо методом контрольного об'єму [16]. Фігура, грані якої розташовані таким чином, що вузлові точки були у середині квадрата або прямокутника, називається контрольним об'ємом. При розбитті розрахункової області сіткою можливі три варіанти розташування контрольних об'ємів [17]: контрольний об'єм з вузловою точкою розташований у середині, на границі і в куту розрахункової зони.

В розрахунках приймаємо, що теплофізичні характеристики, тіло λ (коефіцієнт теплопровідності), γ (щільність) і C (теплоємність) є сталими.

Температура тіла в початковий момент часу ($\tau=0$, с) розподілена рівномірно: $t(r, z, \phi)=20$ °С. Розглядуємо осесиметричну задачу і початок координат розміщуємо у точці перетину вісі і площини дотику водоохолоджуваної плити і верхнього електроду-пуансону. Залежність від температури у зоні контакту торця верхнього електроду-пуансону і підставки з водоохолоджуваними плитами представимо аналітично у вигляді:

$$t(r, \tau)=t_c=(1-e^{-\alpha\tau}), \quad (1)$$

де t_c і α – константи ($t_c=200$ °С, $\alpha=0,055$ с).

Задачу вирішуємо в циліндричній системі координат; для трьохмірної нестационарної теплопровідності твердих тіл загальне диференціальне рівняння має вигляд:

$$\gamma c \frac{\partial t(r, \phi, z)}{\partial \tau} = \lambda \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial t(r, \phi, z)}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t(r, \phi, z)}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}(r, \phi, z) \right] + Q_v, \quad (2)$$

де r – радіальна координата, φ – кутова координата, z – осьова координата, Q_v – питома теплопродуктивність внутрішніх джерел тепла за рахунок Джоулевого нагріву.

Розподіл теплового потоку володіє осьовою симетрією, тому рівняння (2) буде мати наступний вид:

$$\gamma_{i,j} c_{i,j} \left(N - \frac{1}{2} \right) \Delta R^2 \Delta z \Delta \varphi \frac{t_N^{n+1} - t_N^n}{\Delta \tau} \quad (3)$$

При цьому процес теплопровідності можна вважати двовірним, тобто $t=t(r, z, \tau)$. Виділимо частину полого циліндру ABCDEFKL (рис. 1) з достатньо малим кутом $\Delta \varphi$ у площині сектору ОСД і висотою Δz .

Швидкість змінення тепломісткості контрольного об'єму ABCDEFK (на рис. 2 з номерами $i=1, j=3$) за проміжок часу $\Delta \tau$ визначається співвідношенням

$$\gamma_{i,j} c_{i,j} \left(N - \frac{1}{2} \right) \Delta R^2 \Delta z \Delta \varphi \frac{t_N^{n+1} - t_N^n}{\Delta \tau}, \quad (4)$$

де $c_{i,j}$ – теплоємність матеріалу контрольного об'єму; $\gamma_{i,j}$ – щільність матеріалу контрольного об'єму; ΔR – крок по радіальній координаті; Δz – крок по осьовій координаті; $\Delta \tau$ – крок по часу; n – порядковий номер кроку по часу; t_N^{n+1} – невідома температура контрольного об'єму у проміжок часу $\tau=(n+1) \Delta \tau$; t_N^n – відома температура контрольного об'єму в попередній проміжок часу (рис. 4).

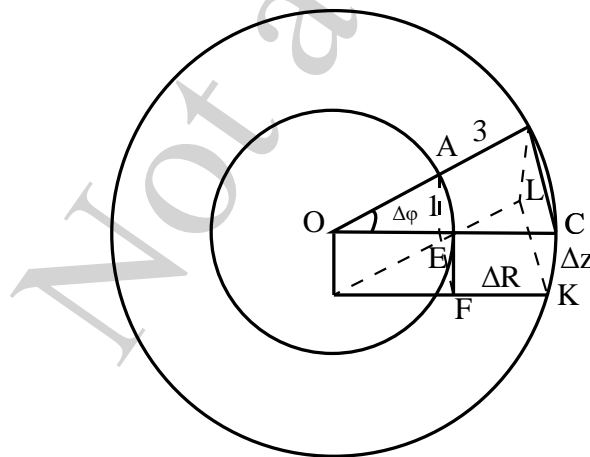


Рис. 1. Загальний вигляд контрольного об'єму елементів оснастки

Водоохолоджуюча плита

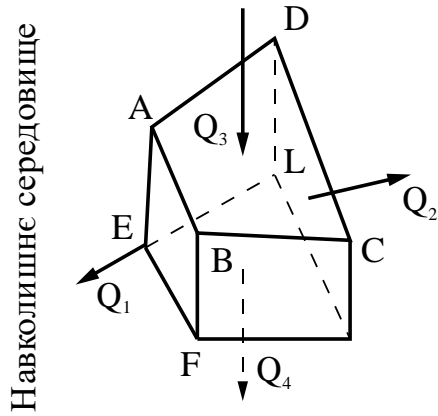


Рис. 2. Схема проходження теплових потоків через контрольний об'єм

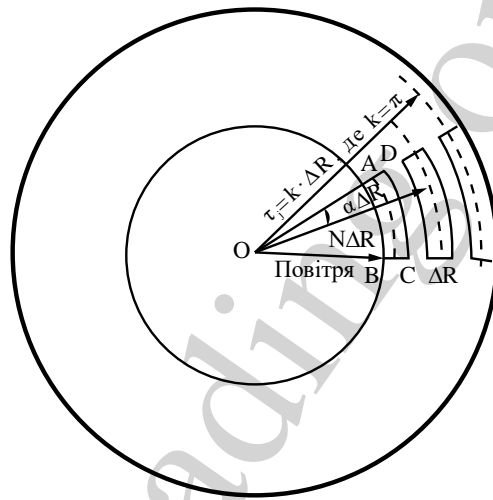


Рис. 3. Схема проходження теплових потоків у радіальному напрямку

Водоохолоджуюча плита

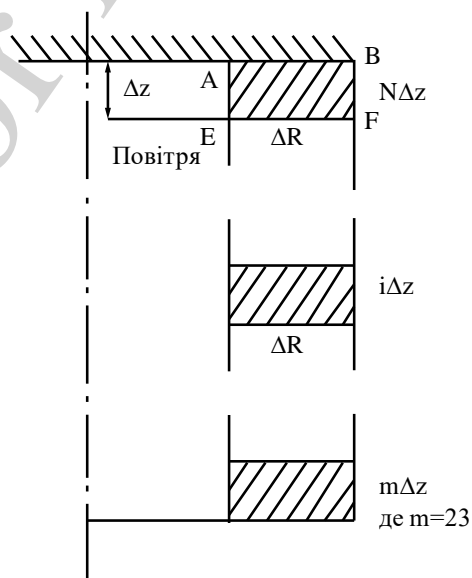


Рис. 4. Схема проходження теплових потоків у вертикальному напрямку

Баланс тепла у замкнутих просторах в елементах оснастки описується рівнянням

$$c_B \gamma_B V_B \frac{\partial t_B}{\partial \tau} = \alpha \left[F_1 (t_1 - t_{cp}) + F_2 (t_2 - t_{cp}) + F_3 (t_3 - t_{cp}) \right], \quad (5)$$

де c_B , γ_B , V_B – теплоємність, щільність, об'єм повітря; F_1 – F_3 – площа контакту дотичних шарів повітря з внутрішніми стінками елементів оснащення, утворюючих замкнуті простори 1, 2 і 3 відповідно; α – коефіцієнт тепловіддачі; t_1 – t_3 – температура внутрішніх стінок замкнутих об'ємів.

Кількість тепла Q_1 (рис. 2, 3), що увійшло в даний об'єм через ліву грань АЕФВ площею $S_1 = N \Delta R \Delta z \Delta \phi$ у радіальному напрямку, дорівнює:

$$Q_1 = N \Delta R \Delta z \Delta \phi \alpha_c (t_B - t_{i,j}^n), \quad (6)$$

де

$$t_B = t_{B_0} + \frac{\Delta \tau \alpha F}{V_B c_B \gamma_B} (t_{пов.} - t_{cp.}) \quad (7)$$

– різницевий вираз, де t_B – температура повітря на протязі процесу спікання. Кількість теплоти Q_2 , яке пішло із даного об'єму через праву грань ЛКСД (рис. 2) площею $S_2 = (N+1) \Delta R \Delta z \Delta \phi$ за допомогою теплопровідності, дорівнює

$$Q_2 = (N+1) \Delta R \Delta z \Delta \phi \frac{(t_{i,j}^n - t_{i,j+1}^n)}{\frac{\Delta R}{2\lambda_{i,j}} + \frac{\Delta R}{2\lambda_{i,j+1}}}, \quad (8)$$

де вираз

$$\left(\frac{\Delta R}{2\lambda_{i,j}} + \frac{\Delta R}{2\lambda_{i,j+1}} \right) \quad (9)$$

отримано, виходячи з наступних міркувань (рис. 3).

Теплові потоки на одну одиницю площі двох контрольних об'ємів (1 і 2) будуть виглядати у вигляді рівняння

$$Q_{ед.} = \lambda_{i,j} + \frac{t_{i,j+\frac{1}{2}}^n - t_{i,j}^n}{\frac{\Delta R}{2}} = \lambda_{i,j+1} \frac{t_{i,j+1}^n - t_{i,j+\frac{1}{2}}^n}{\frac{\Delta R}{2}}, \quad (10)$$

при умові нерозривності теплового потоку на межі розподілу прогрітої (1) і не-прогрітої (2) зон перетину тіла.

Перетворимо рівняння (10)

$$\lambda_{i,j} t_{i,j+\frac{1}{2}}^n - \lambda_{i,j} t_{i,j}^n = \lambda_{i,j+1} t_{i,j+\frac{1}{2}}^n \quad (11)$$

або

$$(\lambda_{i,j} + \lambda_{i,j+1}) t_{i,j+\frac{1}{2}}^n = \lambda_{i,j+1} t_{i,j}^n + \lambda_{i,j} t_{i,j}^n \quad (12)$$

Із (12) знайдемо шукану величину

$$t_{i,j+\frac{1}{2}}^n = \frac{\lambda_{i,j+1} t_{i,j}^n + \lambda_{i,j} t_{i,j}^n}{\lambda_{i,j} + \lambda_{i,j+1}} \quad (13)$$

Підставимо значення $t_{i,j+\frac{1}{2}}^n$, використовуючи (6), у вираз для сумарного потоку $Q_{\text{од.}}$ двох контрольних об'ємів:

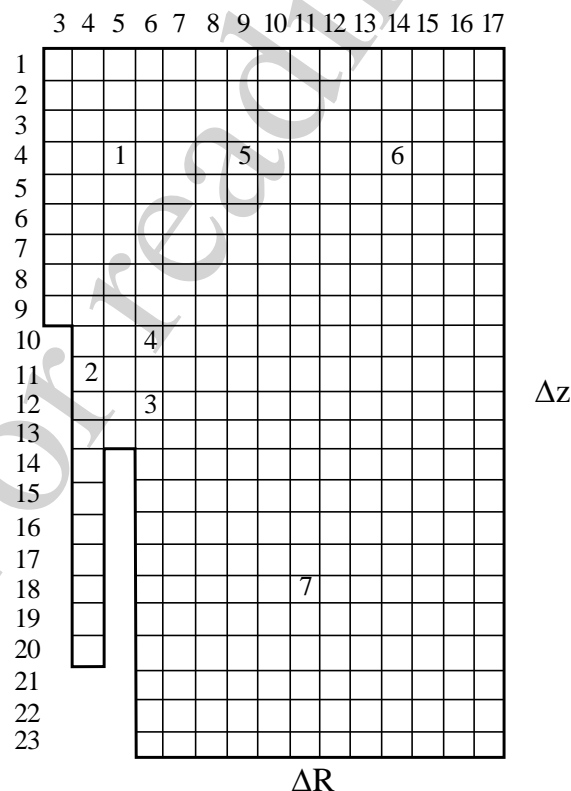


Рис. 5. Перетин елементів оснастки, розбитих на 318 контрольних об'ємів: 1 – верхній електрод-пуансон, 2 – ігла, 3 – нижній електрод-пуансон, 4 – виріб, що спікається, 5 – азбоцементна матриця-вставка, 6 – обойма, 7 – підставка

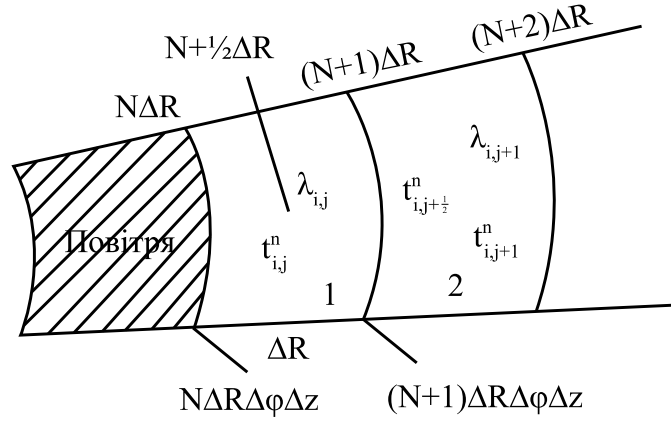


Рис. 6. До питання визначення коефіцієнту теплопровідності двох контрольних об'ємів

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{ед.}} &= 2\lambda_{i,j} \frac{1}{\Delta R} \left(\frac{\lambda_{i,j+1} t_{i,j+1}^n + \lambda_{i,j} t_{i,j}^n}{\lambda_{i,j} + \lambda_{i,j+1}} - t_{i,j}^n \right) = \\
 &= \frac{2\lambda_{i,j}}{\Delta R} \left(\frac{\lambda_{i,j+1} t_{i,j+1}^n + \lambda_{i,j} t_{i,j}^n - t_{i,j}^n \lambda_{i,j}}{\lambda_{i,j} + \lambda_{i,j+1}} - \frac{\lambda_{i,j+1} t_{i,j}^n}{\lambda_{i,j} + \lambda_{i,j+1}} \right) = \\
 &= \frac{2\lambda_{i,j} \lambda_{i,j+1}}{\Delta R} \frac{t_{i,j+1}^n - t_{i,j}^n}{\lambda_{i,j} + \lambda_{i,j+1}} = \frac{2}{\Delta R} \frac{\lambda_{i,j} \lambda_{i,j+1} (t_{i,j+1}^n - t_{i,j}^n)}{\lambda_{i,j} + \lambda_{i,j+1}} = \frac{t_{i,j+1}^n - t_{i,j}^n}{\frac{\Delta R}{2\lambda_{i,j}} + \frac{\Delta R}{2\lambda_{i,j+1}}}, \quad (14)
 \end{aligned}$$

де $\lambda_{i,j}$ та $\lambda_{i,j+1}$ теплопровідності двох контрольних об'ємів (рис. 6).

Кількість теплоти Q_3 , яка надходить за рахунок теплопровідності у вертикальному напрямку через верхню грань АВСД (рис. 2, 3) площею

$$S_3 = \left(N + \frac{1}{2} \right) (\Delta R)^2 \Delta \phi \quad (15)$$

дорівнює

$$Q_3 = \left(N + \frac{1}{2} \right) (\Delta R)^2 \Delta \phi \frac{t_{i,j}^n - t_{i+1,j}^n}{\frac{\Delta z}{2\lambda_{i,j}} + \frac{\Delta z}{2\lambda_{i+1,j}}}. \quad (16)$$

5. 2. Аналіз внутрішніх джерел тепла за рахунок джоулевого нагріву

Кількість теплоти, яка виділилася усередині контрольних об'ємів за рахунок джоулевого нагріву Q , можна представити наступним чином:

$$Q = k' l U \tau, \quad (17)$$

де U – прикладена напруга до інших елементів оснастки (верхній та нижній електрод-пунсон, ігла та підставка), I – сила струму, τ – час протікання електричного струму, k' – параметр, враховуючий ступінь корисного нагріву (приймається нами рівним 0,6).

З другого боку

$$Q = Q_x + Q_y, \quad (18)$$

де Q_x – кількість теплоти, яка виділяється в елементах металевої оснастки, Q_y – кількість теплоти, яка виділяється у спікаємому виробі.

Виходячи з представленої на рис. 7 еквівалентної схеми заміщення блока металевої оснастки (електродів-пунсонів та ігли) і спікаємого виробу, отримуємо формулу:

$$Q_x + Q_y = q_1 + q_2 + q_3 + q_4, \quad (19)$$

де q_1 – q_4 – кількість тепла, яке виділяється на кожному з електроопірів R_1 – R_4 за рахунок джоулевого нагріву (тут R_1 – електроопір верхнього електрода-пунсона, R_2 – електроопір виробу, що спікається, R_3 – електроопір ділянки ігли дотичної з спікаємым виробом, R_4 – електроопір нижнього електрода-пунсона і контактуючої з ним ділянки ігли).

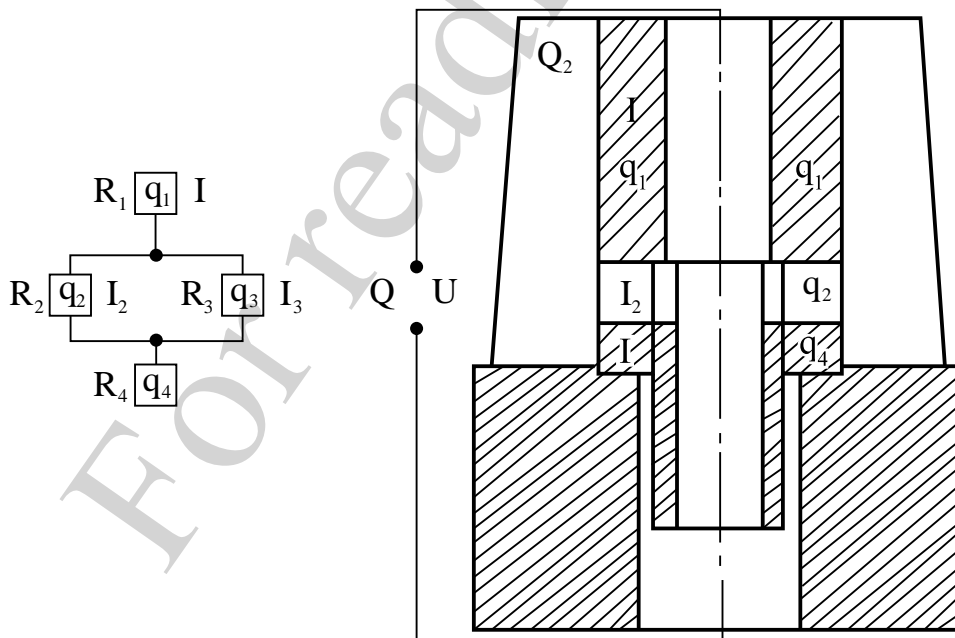


Рис. 7. Еквівалентна схема заміщення блоку елементів металевої оснастки (електродів-пунсонів та ігли) та спікаємого виробу

Знаходимо q_1 – q_4 :

$$q_1 = I_1^2 R_1 \tau, \quad q_3 = I_3^2 R_3 \tau, \quad (20)$$

$$q_2 = I_2^2 R_2 \tau, \quad q_4 = I_4^2 R_4 \tau,$$

де по закону Кирхгофа

$$I_2 = \frac{IR_3}{R_2 + R_3},$$

$$I_3 = \frac{IR_2}{R_2 + R_3}. \quad (21)$$

По значенням q_1 – q_4 визначим Q_x і Q_y :

$$Q_x = q_1 + q_3 + q_4; \quad Q_y = q_2. \quad (22)$$

Питома теплопродуктивність внутрішніх джерел тепла в елементах металевої оснастки Q_{V1} і спікаємого виробу Q_{V2} буде дорівнювати

$$Q_{V1} = \frac{Q_x}{V_x}, \quad (23)$$

де V_x – сумарний об'єм електродів пунсонів та ігли;

$$Q_{V2} = \frac{Q_y}{V_y}, \quad (24)$$

де V_y – об'єм спікаємого виробу.

5. 3. Отримання загального рівняння балансу теплоти

Таким чином, отримуємо рівняння балансу теплоти контрольних об'ємів у загальному вигляді:

$$\begin{aligned}
& c_{i,j} \gamma_{i,j} \left(N - \frac{1}{2} \right) (\Delta R)^2 \Delta z \Delta \varphi (t_N^{n+1} - t_N^n) = N \Delta R \Delta z \Delta \varphi (t_c - t_{i,j}) - \\
& - (N+1) \Delta R \Delta z \Delta \varphi \frac{(t_{i,j}^n - t_{i,j+1}^n)}{\frac{\Delta R}{2\lambda_{i,j}} + \frac{\Delta R}{2\lambda_{i,j+1}}} + \left(N + \frac{1}{2} \right) (\Delta R)^2 \Delta \varphi \times \\
& \times \frac{(t_n - t_{i,j})}{\frac{\Delta z}{2\lambda_n} + \frac{\Delta z}{2\lambda_{i,j}}} - \left(N + \frac{1}{2} \right) (\Delta R)^2 \Delta \varphi \frac{(t_{i,j}^n - t_{i+1,j}^n)}{\frac{\Delta z}{2\lambda_{i,j}} + \frac{\Delta z}{2\lambda_{i+1,j}}} + \\
& + \left(N + \frac{1}{2} \right) (\Delta R)^2 \Delta z \Delta \varphi Q_v.
\end{aligned} \tag{25}$$

Індекси i, j для різних областей (деталей прес-інструменту та спікаємого виробу) змінюються в вказаних нижче межах:

- верхній електрод-пунсон ($3 \equiv j \equiv 6; 1 \equiv i \equiv 9$);
- нижній електрод-пунсон ($5 \equiv j \equiv 6; i \equiv 13$);
- ігла ($j \equiv 4; 10 \equiv i \equiv 20$);
- спікаємий виріб ($5 \equiv j \equiv 6; 10 \equiv i \equiv 12$);
- азбоцементна матриця-вставка ($7 \equiv j \equiv 11; 1 \equiv i \equiv 9$);
- обойма ($12 \equiv j \equiv 17; 1 \equiv i \equiv 13$);
- підставка ($6 \equiv j \equiv 17; 14 \equiv i \equiv 23$).

Перетин елементів оснастки із спікаємим виробом (рис. 5) поділено на 318 контрольних об'ємів. Для кожного контрольного об'єму необхідно скласти рівняння балансу теплоти. Проте, для багатьох об'ємів рівняння виходять ідентичними: по кінцевому рахунку можна записати 19 типів рівнянь балансу теплоти.

В табл. 1 зведені вихідні дані для розрахунку.

Пористість полікомпонентного порошкового кільцевого зразка враховується наступним співвідношенням [19] :

$$\gamma = \gamma_0 (1 - \theta); \quad c = c_0 (1 - \theta), \tag{26}$$

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 - \frac{3}{2} \theta \right); \quad \frac{1}{S} = \left(\frac{1 - \frac{3}{2} \theta}{S_0} \right), \tag{27}$$

де θ – пористість спеченого зразка в частках одиниці (символами з нульовим індексом позначені характеристики безпористого, без індексу – пористого матеріала).

$$\gamma_0 = \sum_{i=1}^n U_i \gamma_0^{(i)}; \quad \lambda_0^{\frac{1}{3}} = \sum_{i=1}^n U_i \lambda_0^{(i)\frac{1}{3}};$$

$$c_0 = \sum_{i=1}^n U_i c_0^{(i)}; \quad \frac{1}{S_0^{\frac{1}{3}}} = \sum_{i=1}^n \frac{U_i}{S_0^{(i)\frac{1}{3}}}, \quad (28)$$

де U – об’ємна частка(в долях одиниці) i -ого компонента, c_0 , λ_0 , γ_0 і s_0 -його щільність, теплоємність, теплопровідність та питомий електроопір відповідно.

Отриманий вираз балансу теплоти для контрольних об’ємів в загальному вигляді дозволяє описати розподіл тепла у всіх елементах оснастки, а також оптимізувати підбор матеріалів, сприяючих концентрації корисного нагріву в зоні спікаємого виробу.

Таблиця 1

Теплофізичні характеристики елементів оснастки і спікаємого виробу

| Елементи оснастки | Матеріал | Електро- і теплофізичні характеристики | | | |
|---|---------------|--|-------------------------|--------------------------------|--|
| | | Щільність, кг/м ³ | Теплоємність, Дж/кг, °С | Теплопровідність, Дж/м·сек, °С | Питомий електроопір, Ом·мм ² /м |
| Верхній електрод-пуансон | Сталь ХВГ | 7800 | 571,2 | 29,4 | 0,271 |
| Ігла | Сталь ХВГ | 7800 | 571,2 | 29,4 | 0,271 |
| Нижній електрод-пуансон | Сталь ХВ | 7800 | 571,2 | 29,4 | 0,271 |
| Матриця-вставка | Азбестоцемент | 2500 | 815 | 0,37 | — |
| Обойма | Дюралюміній | 2700 | 940 | 155 | — |
| Підставка | Сталь 45 | 7800 | 470 | 48 | — |
| Спікаємий виріб (стружка литого прутка) с легуючими порошковими домішками | БрАЖ | 7500 | 400 | 88 | 0,125 |
| | мідь | 8900 | 380 | 410 | 0,169 |
| | графіт | 2300 | 836 | 0,4 | 10 |
| Спікаємого виробу з врахуванням пористості | —«— | 6433 | 370 | 68 | 0,171 |

Приводимо чисельний розрахунок для режиму з часом спікання 90 с, з кількістю тепла, яке виділяється за рахунок джоулевого нагріву в одиниці об’єму елементів металевої оснастки $Q_{V1}=3250$ Дж/см, в одиниці об’єму виробу $Q_{V2}=3080$ Дж/см.

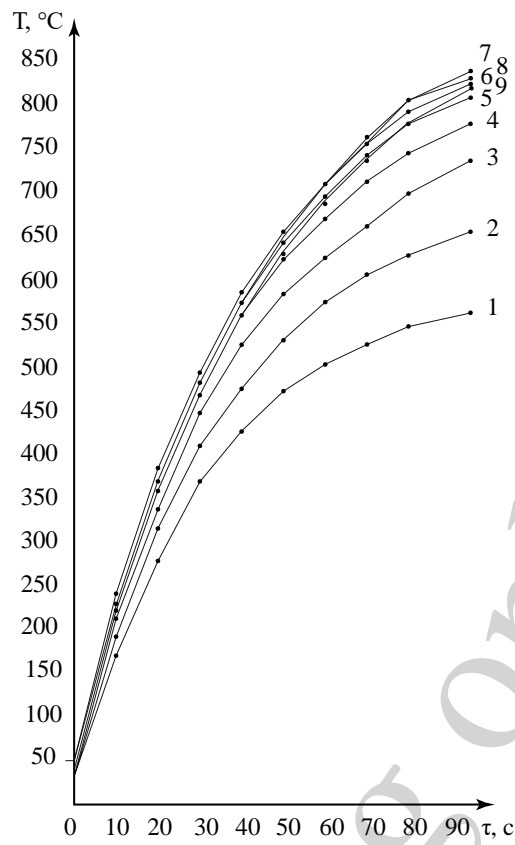


Рис. 8. Часова залежність температури верхнього електрода-пуансона при нагріві електричним струмом

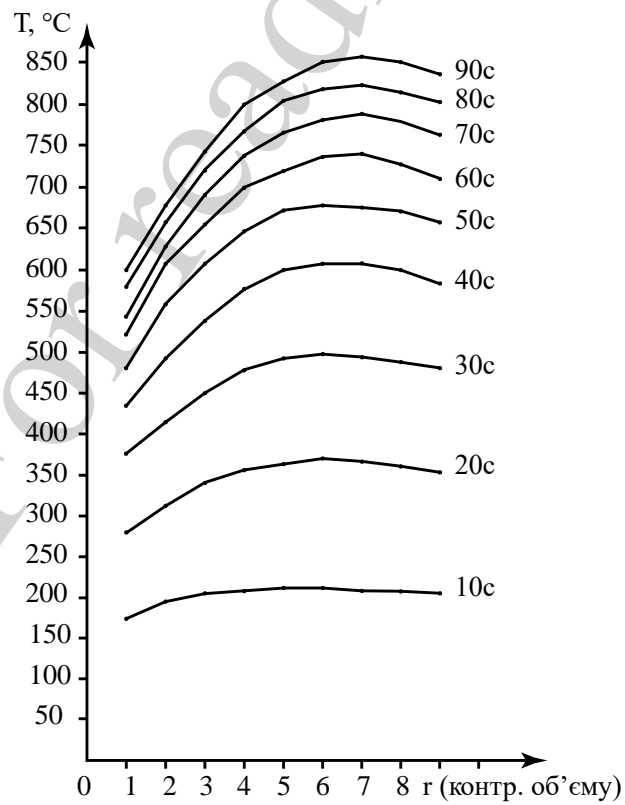


Рис. 9. Просторова залежність температури верхнього електрода-пуансона при нагріві електричним струмом

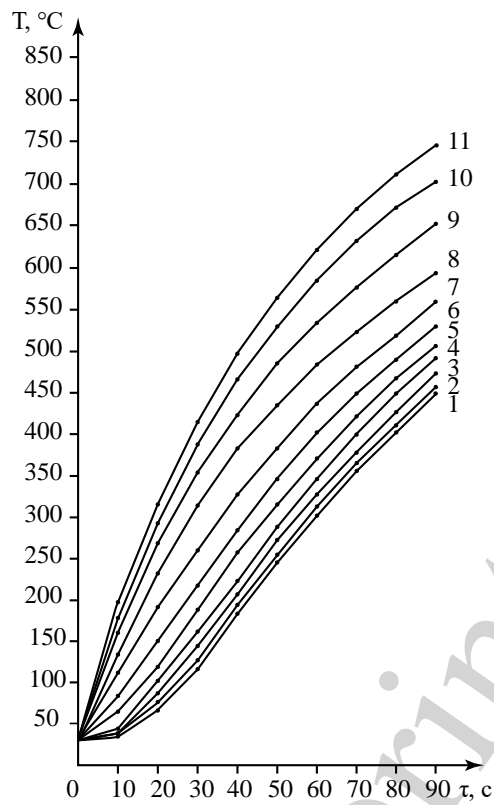


Рис. 10. Часова залежність температури ігли при нагріві електричним струмом

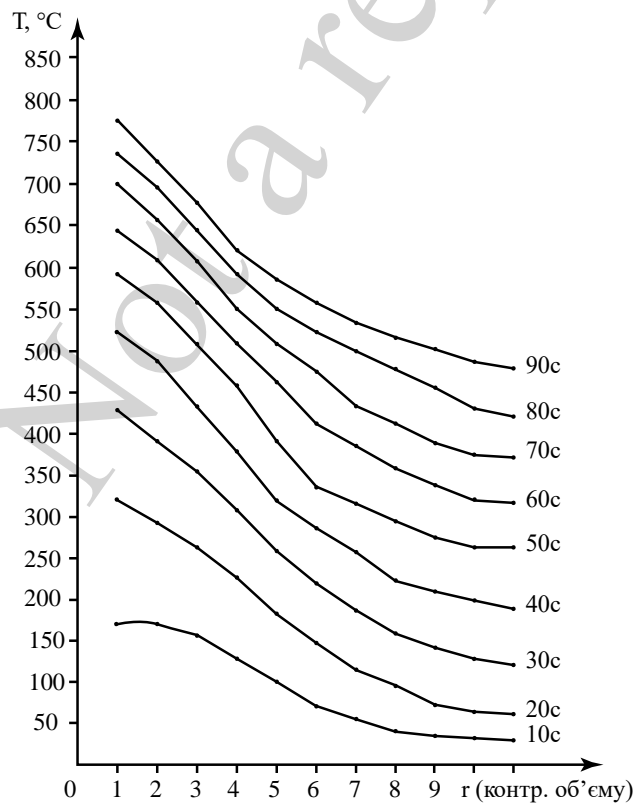


Рис. 11. Просторова залежність температури ігли при нагріві електричним струмом

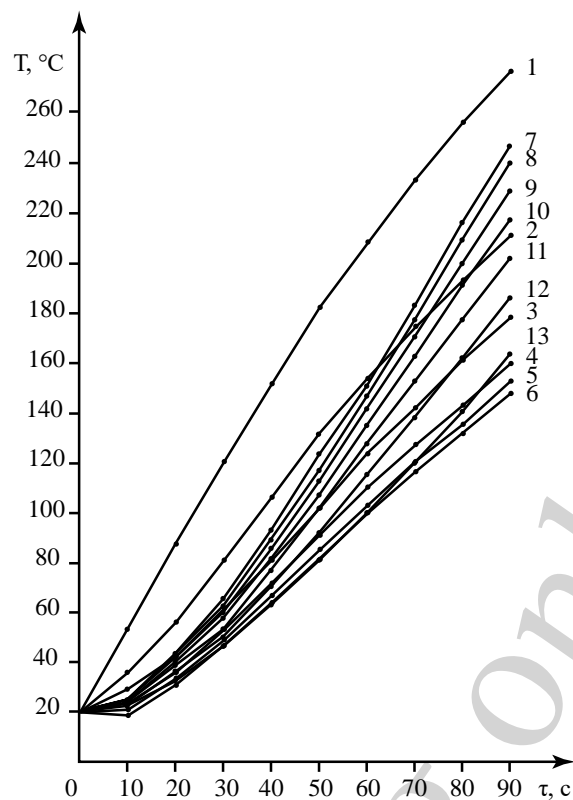


Рис. 12. Часова залежність температури азбоцементної матриці-вставки при нагріві електричним струмом спікаємої деталі і металевих компонентів прес-інструмента

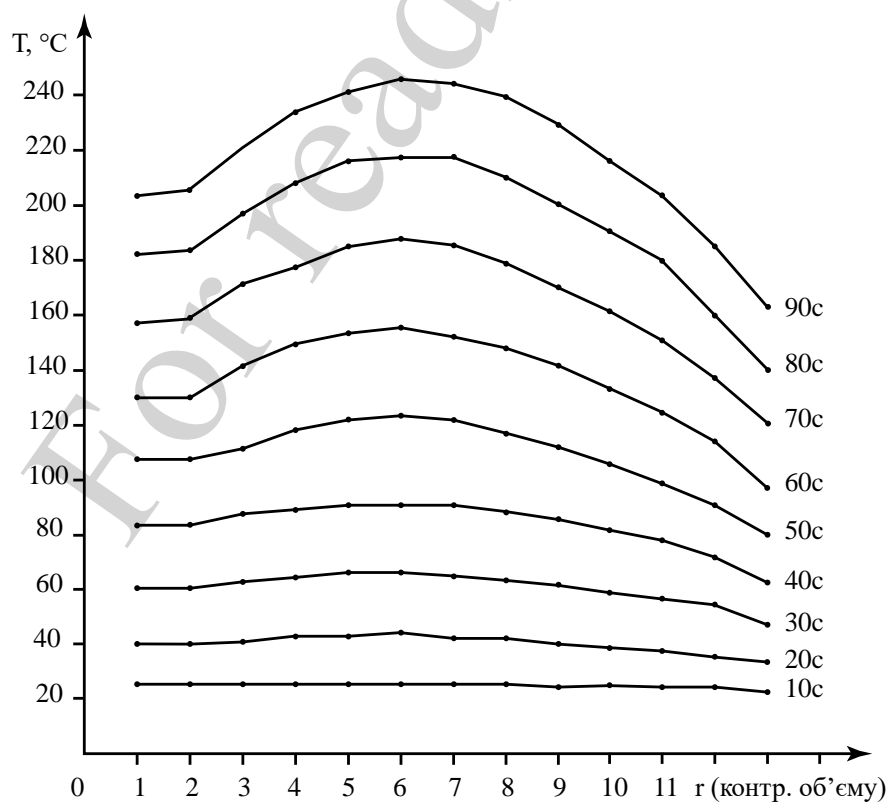


Рис. 13. Просторова залежність температури азбоцементної матриці-вставки при нагріві електричним струмом

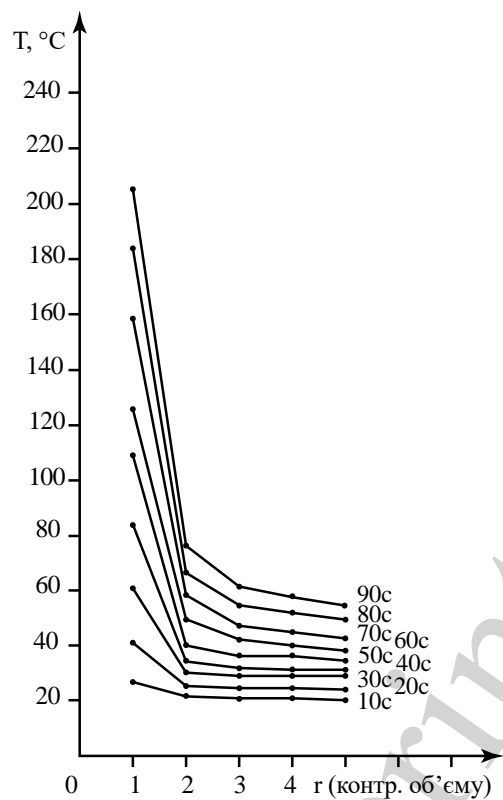


Рис. 14. Радіальна просторова залежність температури азбоцементної матриці-вставки при нагріві електричним струмом

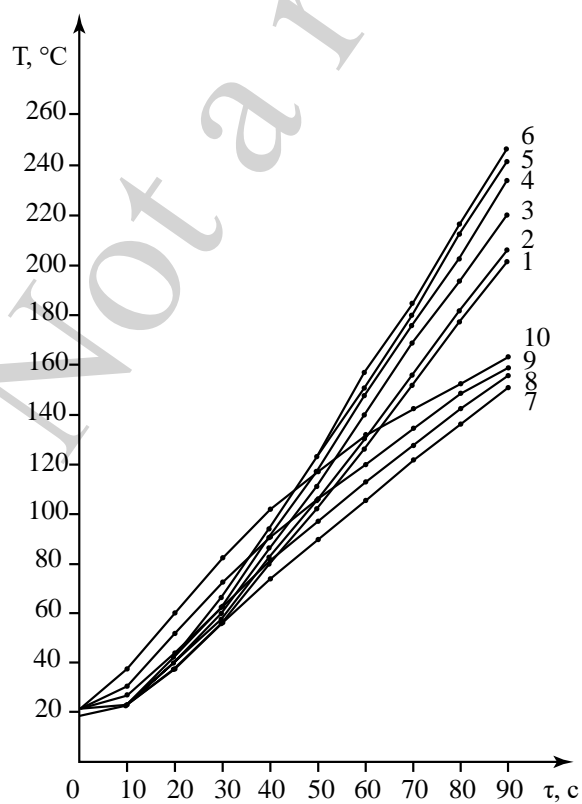


Рис. 15. Часова залежність температури сталій підставки при нагріві електричним струмом

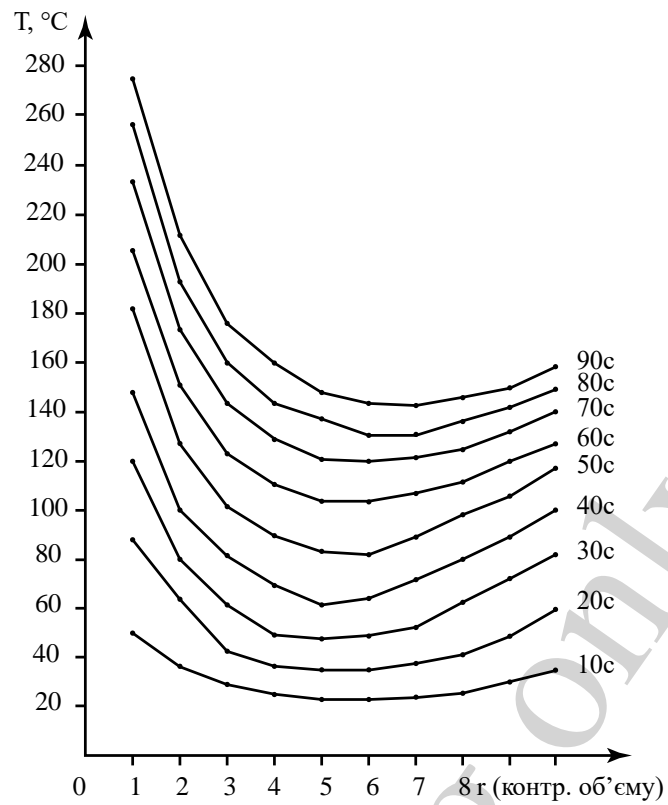


Рис. 16. Просторова залежність температури сталюї підставки при нагріві електричним струмом

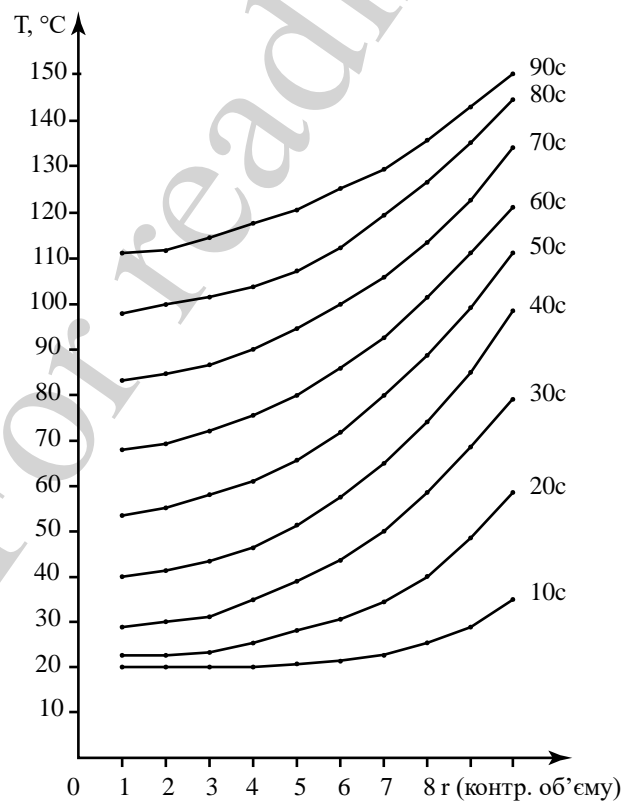


Рис. 17. Осьова просторова залежність температури сталюї підставки для області з координатами $j=17; 14 \leq i \leq 23$

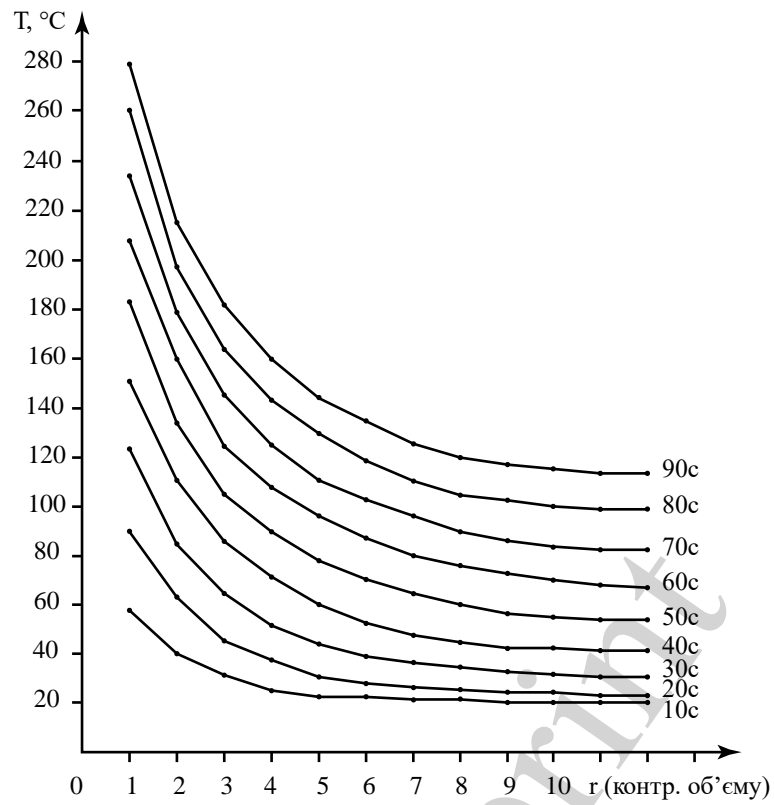


Рис. 18. Радіальна просторова залежність температури сталій підставки

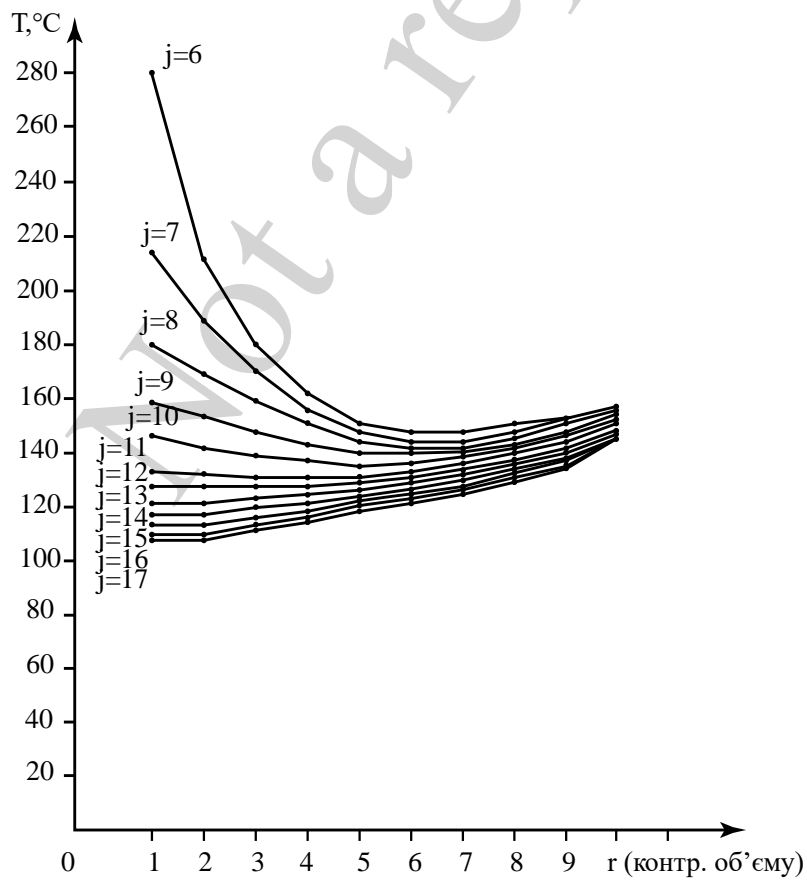


Рис. 19. Просторова залежність температури при фіксованому значенні часу ($t=90$ °C) для області $14 \leq i \leq 23$

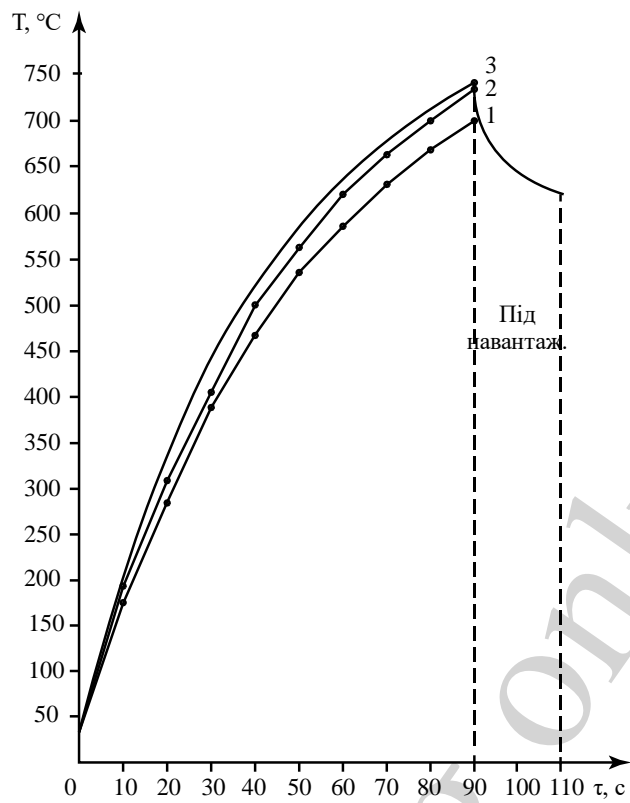


Рис. 20. Часова залежність температури спікаємого виробу при нагріві електричним струмом

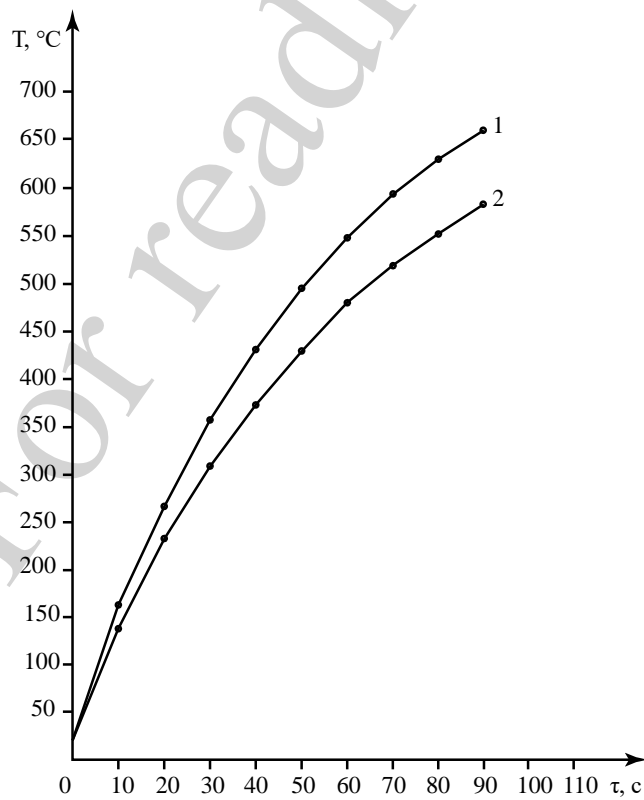


Рис. 21. Часова залежність температури нижнього електрода-пуансона при нагріві електричним струмом

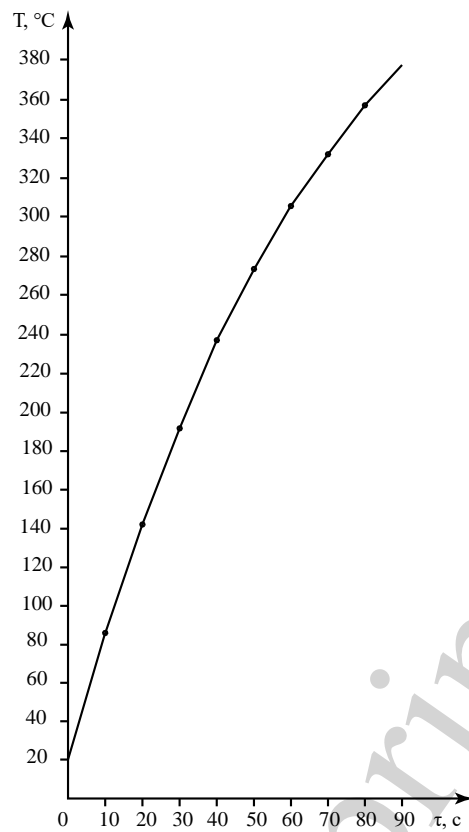


Рис. 22. Часова залежність темпеператури повітря, яке знаходиться у замкнутому об'ємі прес-форми, при нагріві електричним струмом

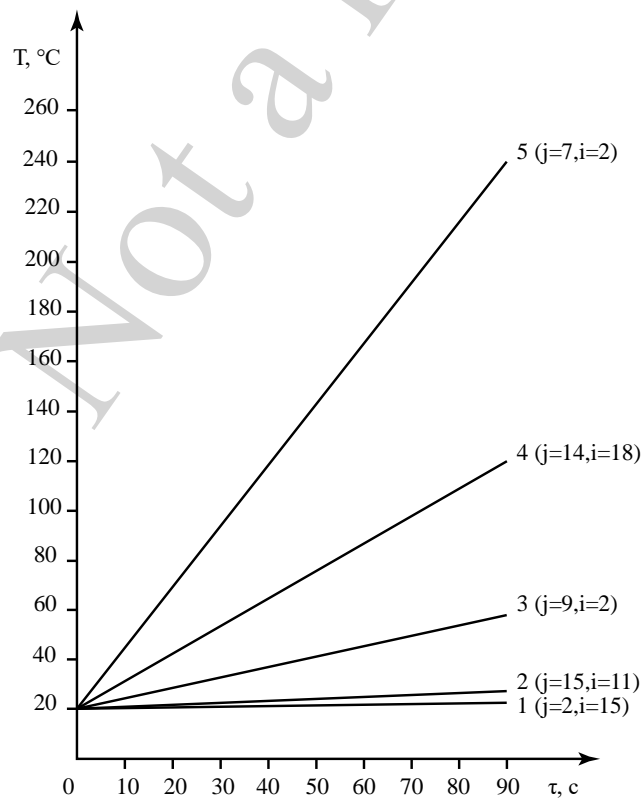


Рис. 23. Експериментальна часова залежність температури елементів оснастки при нагріві їх електричним струмом

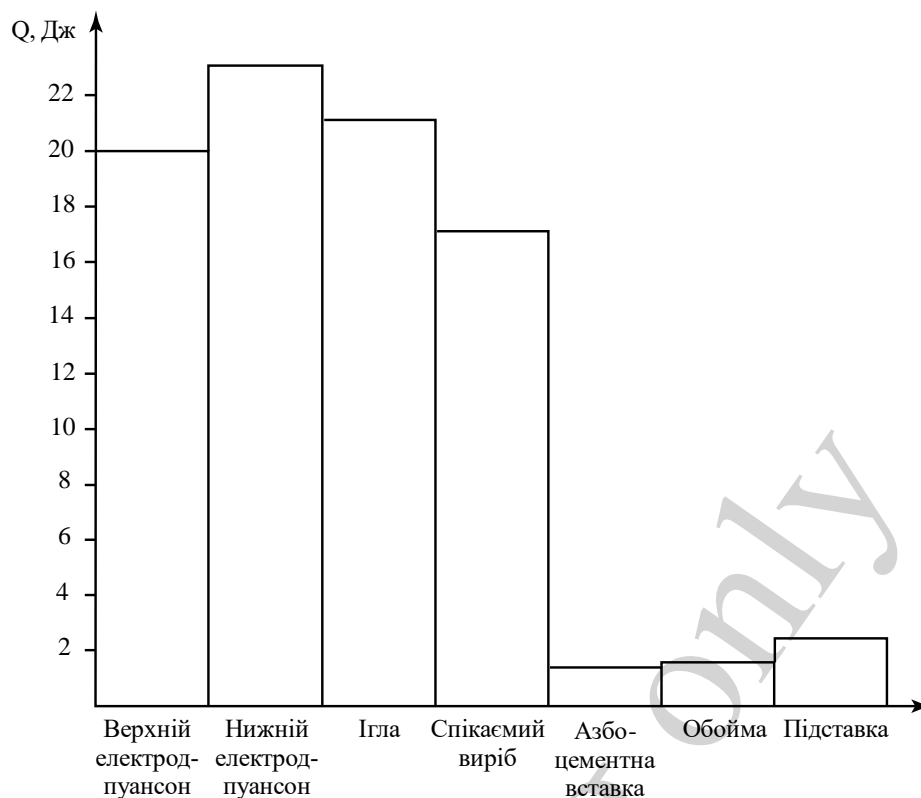


Рис. 24. Баланс розподілу тепла, яке виділяється в одиниці об'єму елементів оснастки і спікаємого виробу, в одиницю часу

6. Обговорення результатів дослідження моделювання процесу нагріву елементів оснастки

Результати розрахунку представлені на рис. 8–24. По мірі поширення тепла до спікаємого об'єкту відносно висоти верхнього електрода-пуансона (рис. 8) (координати $j=3$, $1 \leq i \leq 9$) температура поступово збільшується на ділянках 1–7 і досягає свого максимуму, який дорівнює 845°C . В подальшому помітна тенденція до зменшення в зонах, близьких до виробу (криві 8,9) до температури 823°C . Певне, це пов'язано з складним впливом між електро- і теплофізичними властивостями матеріалу електрода-пуансона і спікаємого порошку і балансом процесів генерування тепла, його притоку та відтоку [20]. На рис. 8 дана часова, а на рис. 6 – просторова залежності температури верхнього електрода-пуансона.

Для зменшення маси оснастки і більш швидкого розогріву її компонентів (верхнього електрода-пуансона та ігли) останні виконані порожніми. Рухома ігла формує внутрішню стінку спікаємої втулки і розігрівається в кінці процесу в цій зоні до середньої температури 73°C . На рис. 10 видно, як монотонно зменшується температура по висоті ігли ($j=4$; $10 \leq i \leq 20$) з плином часу. Температура ігли в зоні, оточеної повітрям, зменшується менш інтенсивно внаслідок незначного конвективного теплообміну, обумовленого нагрітим повітрям в замкнутому об'ємі (рис. 11).

В області контакту внутрішніх стінок азбоцементної матриці з верхнім електродом-пуансоном ($j=7$; $1 \leq i \leq 9$) для часових залежностей (рис. 12) включно по контрольний об'єм з координатою $i=6$ температура підвищується, та макси-

мальне її значення досягає 248 °С. З наближенням до спікаємого виробу вона починає падати (криві 7–9) і в області дотику стінки з нижнім електродом-пунсоном температура досягає 166 °С (крива 13).

Якісну картину дає осьова та радіальна просторові залежності температури азбоцементної матриці-вставки при нагріві електричним струмом (рис. 13, 14).

Як відомо, при термообробці азбестові волокна зазнають ряд змін, які впливають на їх фізичні властивості [21]. У випадку тривалої витримки при температурі 110 °С виділяється значна частина адсорбційної води, падає механічна міцність волокон азбесту, обумовлюючи тим самим знос матриці. По мірі віддалення у радіальному напрямку від об'єкту спікання нагрів азбоцементної вставки стає менш інтенсивним, температура її внутрішніх шарів досягає 20–35 °С (рис. 14).

Температура сталльної підставки ($j=6; 14 \leq i \leq 23$) в кінці процесу по мірі віддалення від нижнього електрода-пунсона (рис. 15) змінюється в діапазоні від 279 °С до 147 °С (криві 1–6). Потім відбувається поступове збільшення її з наближенням до нижньої водоохолоджувальної плити (криві 7–10). Вельми рельєфно відбиває змінення температури підставки її просторова залежність (рис. 16) для кожного відрізка часу. На рис. 17 показано змінення температури для ряду контрольних об'ємів ($j=17; 14 \leq i \leq 23$) підставки. В цьому випадку температура контрольного об'єму ($j=17; i=14$) у зоні дотику з дюралюмінієвою обоймою (фактично між ними повітряний зазор товщиною 2...3 мм) по причині відсутності джоулевого нагріву трохи менше і з плином часу змінюється від 150 до 35 °С. Підставка стикається з нижнім електродом-пунсоном, азбоцементною матрицею-вставкою та обоймою; розподіл температури в радіальному напрямку в цих зонах характеризується кривими, що монотонно знижуються (рис. 18).

Залежності температури від осьової координати в сталній підставці поблизу від внутрішньої повітряної порожнини мають максимуми; по мірі віддалення, до периферії, криві набувають монотонно зростаючий характер (рис. 19).

Для вертикальної зони $j=6$ у зоні контакту з нижнім електродом-пунсоном спостерігається максимум температури, який дорівнює 278 °С. По мірі віддалення від джерела джоулевого нагріву температура монотонно зменшується в області $14 \leq i \leq 21$ до 146 °С, а в зоні, контактуючої з нижньою водоохолоджуваною плитою ($21 \leq i \leq 23$), з'являється тенденція збільшення до 158 °С. Здається, це пов'язано з масивністю підставки та розсіюванням теплового потоку [22, 23].

Розрахункове значення температури у верхньому та нижньому шарах спікаємого виробу (стружковий порошок БрАЖ 9-4) (рис. 20, криві 1,2) з координатами $j=5; 10 \leq i \leq 11$ змінюється в кінці процесу від 747 °С до 714 °С [24]. Крива 3 ілюструє експериментальну залежність температури від часу, значення якої досягає 750 °С. Характер кривої такий же, як і у розрахункових залежностей. Після 90 с прикладався кінцевий тиск на протязі 20 с і температура падала до 635 °С [25].

Часова залежність температури нижнього електрода-пунсону аналогічна вищенаведеній залежності (рис. 21; $j=5; 12 \leq i \leq 13$), проте, при завершенні процесу він нагрівається до трохи меншої температури: для $i=12$ до 650 °С; для $i=13$ до 575 °С. Прес-форма має замкнутий внутрішній простір, усередині якого міститься деяка кількість повітря. Обмін повітря з навколишнім середовищем практично

відсутній. Із-за вельми слабого конвективного теплообміну маса повітря швидко нагрівається (рис. 22), що грає свою роль в нагріві дотичних частин металевої оснастки. Так, в кінці процесу повітря нагрівається до температури 378 °С.

Змінення температури обойми незначне і розрахункове значення досягає 22–23 °С, а у зоні, контактуючої із сталлюю підставкою 32 °С. Експериментальні вимірювання показали, що у верхній половині обойми температура збільшується від 25 до 26 °С (рис. 23, крива 1), а в нижній – від 27 до 29 °С (крива 2).

За допомогою термопар були зафіксовані значення температури азбоцементної матриці у точках з координатами $j=8; i=2$ і $j=9; i=2$ 240 та 60 °С (рис. 23, криві 3 і 5). Наприклад, розрахункове значення температури у точці ($j=8; i=2$) складає 240 °С; у той же час як експериментальне 223 °С.

У сталлюю підставки в точці з координатами $j=14; i=18$ розрахункова температура складала 123 °С, а експериментальна 120 °С (рис. 23, крива 4).

На основі отриманого балансу тепла для контрольних об'ємів в загальному вигляді маємо розподіл останнього в елементах оснастки (рис. 24).

Перевага методу контрольного об'єму (МКО) полягає в тому, що він заснований на макроскопічних фізичних законах, в ньому закладено точне інтегральне збереження таких величин, як маса, імпульс та енергія на будь-якій групі контрольних об'ємів. Рішення, отримане за допомогою МКО, завжди буде зберігати баланс енергії у всій розрахунковій області, чого неможна сказати про рішення, знайдені іншими методами. Безумовними перевагами даного метода є висока ефективність та простота реалізації, а також наочність процедури дискретизації, яка дає можливість побудови схем високого порядку точності. Однак ці переваги реалізуються тільки при застосуванні достатньо регулярної (структурованої) сітки – майже ортогональної і з плавно мінливими розмірами комірок. Як наслідок, переважна більшість додатків МКО обмежена випадками доволі простих по геометрії розрахункових областей.

Розвиток даного дослідження полягає в застосуванні більш зносостійких матеріалів, зокрема заміни в перспективі азбоцементної вставки на матеріали з діелектричними покриттями. Обмеження в отриманні майбутніх експериментальних результатах може спіткати дослідників на етапі фіксації контрольних параметрів при електроспінанні через можливість виникнення небажаних електрофізичних ефектів.

Попереднє моделювання процесу активованої обробки електричним струмом порошкових виробів дозволить більш доцільний вибір матеріалів оснастки і оптимізувати майбутній технологічний цикл.

Дані дослідження не є продовженням раніш проведених, але в подальшому автори збираються їх вдосконалити.

7. Висновки

1. Проведеними аналітичними дослідженнями вирішена задача нагріву в елементах прес-форми: обойма-азбоцементна вставка-верхній електрод-пунсон-спікаємий зразок-нижній електрод-пуансон-підставка шляхом отримання рівняння балансу теплоти для останніх у загальному вигляді. Отриманий вираз для контрольних об'ємів оснастки дозволяє описати розподіл тепла у всіх елемен-

тах оснастки, а також оптимізувати вибір матеріалів, сприяючих концентрації корисного нагріву в зоні спікаємого виробу.

2. Проведений математичний опис розподілу тепла в розглянутій моделі дав можливість встановити загальну картину змін температурних полів у відповідності з графічними кривими, представленими на рис. 8–24. Особливості їх формування полягають у наступному:

- просторова та часова залежності температури верхнього електрода-пунсона мають нелінійний характер, на більшій частині якого вона збільшується; у зонах, близьких до виробу, напевно, відбувається інтенсивний відтік тепла;

- зменшення температури рухомої ігли відбувається на протязі всього процесу спікання; у частині, оточеної повітрям, воно менш інтенсивно;

- у випадку тривалої витримки в матриці при температурі 110 °С виділяється значна частина адсорбційної води, падає механічна міцність волокон азбесту, обумовлюючи тим самим знос матриці;

- розрахункові значення температури у верхньому та нижньому шарах спікаємого виробу доволі близькі між собою та мало відрізняються від експериментального і змінюються в кінці процесу від 747 °С до 714 °С ;

- в спікаємому виробі зосереджується 24 % теплової енергії, яка виділяється у всьому “блоці” (прес-інструмент-виріб).

Розглянута математична модель дає можливість спрямованого регулювання температурних полів шляхом попереднього розрахунку та вибору матеріалів оснастки по теплофізичним характеристикам.

Литература

1. Морозов, А. С., Райченко, А. И. (1988). Некоторые структурные особенности материалов, полученных электроспеканием дробленой стружки алюминиевой бронзы. Электронная обработка материалов, 5, 38–41.
2. Морозов, А. С., Буренков, Г. Л., Райченко, А. И., Томчак, Н. Н., Лысаковский, Н. И. (1987). Влияние степени окисленности на структуру и свойства материала полученного электрическим спеканием стружкового порошка алюминиевой бронзы. Порошковая металлургия, 10, 44–48.
3. Райченко, А. И., Черникова, Е. С. (1989). Математическая модель электрического нагрева пористой среды совместно с подводящими электродами-пунсонами. Порошковая металлургия, 5, 34–41.
4. Пилипченко, А. В., Цитрин, А. И., Хоменко, А. Н. (1987). Моделирование температурного поля при прямом электрическом нагреве порошковых материалов. Порошковая металлургия, 3, 26–29.
5. Крейт, Ф., Блэк, У. (1983). Основы теплопередачи. М.: Мир, 512.
6. Самарский, А. А. (1971). Введение в теорию разностных схем. М.: Наука, 552.
7. Zhang, Z.-H., Liu, Z.-F., Lu, J.-F., Shen, X.-B., Wang, F.-C., Wang, Y.-D. (2014). The sintering mechanism in spark plasma sintering – Proof of the occurrence of spark discharge. Scripta Materialia, 81, 56–59. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2014.03.011>

8. Milligan, J., Shockley, J. M., Chromik, R. R., Brochu, M. (2013). Tribological performance of Al–12Si coatings created via Electrospark Deposition and Spark Plasma Sintering. *Tribology International*, 66, 1–11. doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.04.006>
9. Jin, X., Gao, L., Sun, J. (2010). Highly Transparent Alumina Spark Plasma Sintered from Common-Grade Commercial Powder: The Effect of Powder Treatment. *Journal of the American Ceramic Society*, 93 (5), 1232–1236. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2009.03544.x>
10. Kolomeichenko, A. V., Kuznetsov, I. S., Kravchenko, I. N. (2015). Investigation of the thickness and microhardness of electrospark coatings of amorphous and nanocrystalline alloys. *Welding International*, 29 (10), 823–825. doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2014.986892>
11. Kumar, P., Parkash, R. (2016). Experimental investigation and optimization of EDM process parameters for machining of aluminum boron carbide (Al–B₄C) composite. *Machining Science and Technology*, 20 (2), 330–348. doi: <https://doi.org/10.1080/10910344.2016.1168931>
12. Rafi, H. K., Starr, T. L., Stucker, B. E. (2013). A comparison of the tensile, fatigue, and fracture behavior of Ti–6Al–4V and 15-5 PH stainless steel parts made by selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69 (5-8), 1299–1309. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5106-7>
13. Zuo, F., Saunier, S., Marinel, S., Chanin-Lambert, P., Peillon, N., Goeuriot, D. (2015). Investigation of the mechanism(s) controlling microwave sintering of α -alumina: Influence of the powder parameters on the grain growth, thermodynamics and densification kinetics. *Journal of the European Ceramic Society*, 35 (3), 959–970. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2014.10.025>
14. Райченко, А. И., Черникова, Е. С. (1989). Теоретический анализ нагрева псевдосплавов путем пропускания электрического тока. *Порошковая металлургия*, 7, 15–17.
15. Grigoriev, E., Rosliakov, A. (2007). Electro Discharge Compaction of WC-Co Composite Material Containing Particles of Diamond. *Materials Science Forum*, 534-536, 1181–1184. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.534-536.1181>
16. Белявин, К. Е. (2004). Получение пористых материалов из тугоплавких металлов методом электроимпульсного спекания. *Теория и практика машиностроения*, 2, 68–77.
17. Райченко, А. И., Сизоненко, О. Н., Деревянко, А. В., Колесниченко, В. Г., Григорьев, Е. Г., Ивлиев, А. И. (2012). Особенности воздействия электрического разряда в процессе консолидации порошков. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг*, 52 (958), 146–154.
18. Григорьев, Е. Г. (2008). Кинетика процессов уплотнения дисперсных материалов при электроимпульсном воздействии. *Известия РАН. Серия физическая*, 72 (9), 1210–1212.
19. Рябинина, О. Н. (2006). Технологические принципы выбора материалов пресс-инструмента при электроразрядной обработке металлических порошков. *Вестник Оренбургского государственного университета*, 10, 414–421.

20. Райченко, О. І. (2016). Модель процесса уплотнения пористого порошкового упруго-вязкого материала при электроспекании. *Металлофизика и новейшие технологии*, 38 (5), 635–645. doi: <https://doi.org/10.15407/mfint.38.05.0635>
21. Геворкян, Е. С., Чешкала, В. О., Кислиця, М. В. (2016). Метод електроконсолідації (електроспінання) як високоефективний метод для компактування нанопорошків з метою отримання композитних матеріалів інструментального та конструкційного призначення. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*, 160, 75–79.
22. Райченко, А. И., Сизоненко, О. Н., Деревянко, А. В., Колесниченко, В. Г., Григорьев, Е. Г. (2012). Анализ изменения состояния порошковых композиций при электроразрядном воздействии (Обзор). *Вісник Українського матеріалознавчого товариства*, 1 (5), 49–56.
23. Замула, М. В., Деревянко, А. В., Колесниченко, В. Г., Самелюк, А. В., Згалат-Лозинский, О. Б., Рагуля, А. В. (2007). Особенности электроразрядного спекания нанокompозитов системы TiN - AlN. *Порошковая металлургия*, 7-8, 19–27.
24. Morozov, A. (2019). Analysis of the technological and morphological peculiarities of bronzed powders production from the swarf wastes. *Technology Audit and Production Reserves*, 1 (3 (45)), 24–26. doi: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.163794>
25. Zavaliangos, A., Zhang, J., Krammer, M., Groza, J. R. (2004). Temperature evolution during field activated sintering. *Materials Science and Engineering: A*, 379 (1-2), 218–228. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.01.052>